中国生态农业学报 2017 年 3 月 第 25 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2017, 25(3): 441−450

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160723

张秀, 张黎明, 龙军, 陈翰阅, 范协裕, 邢世和, 徐福祥. 亚热带耕地土壤酸化程度差异及影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 441−450

Zhang X, Zhang L M, Long J, Chen H Y, Fan X Y, Xing S H, Xu F X. Soil acidification degree difference and impact factors of subtropical cropland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 441−450

亚热带耕地土壤酸化程度差异及影响因素*

张 秀[1,2], 张黎明[1,2], 龙 军[1,2], 陈翰阅[1,2], 范协裕[1,2], 邢世和[1,2**], 徐福祥[3]

(1. 福建农林大学资源与环境学院 福州 350002; 2. 土壤环境健康与调控福建省重点实验室 福州 350002; 3. 中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264000)

摘 要: 准确揭示区域耕地土壤酸化程度及其原因对于耕地质量提升和农业可持续发展具有重要意义。本研究利用地处亚热带的福建省 1982 年 36 777 个和 2008 年 236 445 个耕地表层土壤调查样点属性建立的 1∶25 万耕地土壤数据库, 借助 GIS 技术与灰色斜率关联分析模型探讨了 26 年间全省耕地土壤酸化程度及其原因, 为省域耕地土壤酸性调控提供科学依据。结果表明: 1982—2008 年间福建省 67.60%的耕地土壤发生不同程度酸化, 其中强度、中度和弱度酸化面积分别占全省耕地总面积的 0.83%、18.26%和 48.52%。就行政区域差异而言, 强度酸化耕地主要分布在龙岩市, 占全省强度酸化耕地总面积的 86.88%, 其次为泉州市, 占比为 8.39%; 中度酸化耕地主要分布在南平市、龙岩市和泉州市, 分别占全省中度酸化耕地总面积的 29.88%、18.10%和 16.94%, 弱度酸化耕地则遍布全省各县市区。从土壤类型差异来看, 潜育水稻土、渗育水稻土和酸性紫色土亚类的酸化面积比例较大, 分别占相应亚类总面积的 82.87%、72.37%和 69.20%; 但渗育和潴育水稻土亚类的酸化程度较为严重, 强度、中度和弱度酸化的渗育和潴育水稻土面积分别占全省耕地相应酸化程度总面积的 98.94%、84.51%和 87.36%。从土地利用类型差异分析, 水田和水浇地的酸化面积比例较高, 分别占相应利用类型总面积的 70.35%和 60.78%。灰色斜率关联分析模型分析表明, 1982—2008 年间酸雨、高温多雨气候及化肥大量施用是引起福建省耕地土壤酸化的主要外因, 故严控工业含硫等酸性废气排放进而控制酸雨和合理调整施肥结构是减缓全省耕地土壤酸化的必要途径。

关键词: 福建; 耕地; 土壤酸化; 土壤类型; 土地利用类型; 灰色斜率关联分析

中图分类号: S15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)03-0441-10

Soil acidification degree difference and impact factors of subtropical cropland*

ZHANG Xiu[1,2], ZHANG Liming[1,2], LONG Jun[1,2], CHEN Hanyue[1,2], FAN Xieyu[1,2], XING Shihe[1,2**], XU Fuxiang[3]

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Key Lab of Soil Ecosystem Health and Regulation of Fujian Province, Fuzhou 350002, China; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264000, China)

Abstract: Soil pH is an important indicator of cropland soil fertility and quality. Decline in soil pH is a vital problem in soils of intensive agricultural systems in China, which heavily obstructed crop growth and improvement of ecological environments.

* 福建省高校杰出青年科研人才计划基金(JA13093)资助
** 通讯作者: 邢世和, 主要从事土地(壤)资源持续利用与评价研究。E-mail: fafuxsh@126.com
张秀, 主要从事农业资源与 GIS 应用研究。E-mail: zx150501@126.com
收稿日期: 2016-08-18 接受日期: 2016-12-12

* This work was supported by the Distinguished Young Scholars Foundation of the Higher Education Institutions in Fujian Province, China (JA13093).
** Corresponding author, E-mail: fafuxsh@126.com
Received Aug. 18, 2016; accepted Dec. 12, 2016

Thus accurate knowledge on the degree of acidification and its causes of regional cropland soils is crucial for the enhancement of the quality of cropland soils and sustainable development of agriculture. In this study, data on topsoil attributes collected from 36 777 sampling sites in the second soil survey in 1982, 236 445 sampling sites of soil fertility investigation for fertilization in 2008, average annual temperature and precipitation for 1980–2008 in Fujian Province were used to establish a 1∶250 000 map of relevant cropland soil attributes database in ArcGIS software. This database, containing a total of 34 593 patches, was used to study the extent of acidification, and combined with the Grey slope correlation analysis model to explore the causes of cropland soils acidification in the province. The aim of the study was to lay the scientific basis necessary for understanding soil acidification regulation. The results showed that the area of acidification during the studied period accounted for 67.60% of the total area of croplands in the province. Also the areas with strong, moderate and low acidifications accounted for 0.83%, 18.26% and 48.52% of total croplands in the province, respectively. Analysis on prefectural city scale showed that strongly acidified croplands were mainly distributed across Longyan City and Quanzhou City, accounting respectively for 86.88% and 8.39% of total strongly acidified croplands in the province. Moderately acidified farmlands were mainly distributed across Nanping City, Longyan City and Quanzhou City, accounting respectively for 29.88%, 18.10% and 16.94% of total moderately acidified cropland in the province. The weakly acidified croplands were widely distributed across Fujian Province. On the whole, strongly and moderately acidified farmlands were mainly distributed across the north, southwest and southeast littoral regions of Fujian Province. In terms of soil type, gley paddy soils, percogenic paddy soils and acid purplish soils had significantly acidized in 1980 to 2008, with acidified areas accounting respectively for 82.87%, 72.37% and 69.20% of total gley paddy soils, percogenic paddy soils and acid purplish soils in the province. However, the acidification degrees of percogenic and hydromorphic paddy soils were relatively severe, with the total area of strong, moderate and low acidifications accounting respectively for 98.94%, 84.51% and 87.36% of total acidified cropland area in the province. In terms of land use type, paddy and irrigated fields were significantly acidified, accounting for a high proportion of the study area. Acidified areas accounted respectively for 70.35% and 60.78% of total paddy and irrigated fields in the study area. Grey slope correlation analysis suggested that increasing severity of acid rain, high temperature, high precipitation and high fertilizer input were the main factors contributing to the acidification of croplands in Fujian Province. An effective control approach of cropland acidification in Fujian Province was by strict control the emissions of industrial acidic exhaust gases containing sulfur. It was also necessary to optimize fertilizer management programs by increasing organic fertilizers application and reducing chemical nitrogen and phosphate fertilizers application.

Keywords: Fujian Province; Farmland; Soil acidification; Soil subgroup; Land use type; Grey slope correlation analysis

在高投入高产出的农业生产中，pH 持续下降所表现出来的土壤酸化是全球农业生产的主要障碍因素之一。土壤酸度的提高不仅会造成大量营养元素的流失和土壤肥力下降，还会严重影响土壤微生物区系和活性以及作物的正常生长[1-3]。据统计，20 世纪末我国的土壤酸化面积已达到 2.04×10^8 hm^2，约占全国土壤总面积的 22.7%[4]。因此，准确揭示区域耕地土壤酸化程度及其原因、科学防治和减缓土壤酸化进程是实现区域农业可持续发展亟待解决的重要问题。国内外学者对不同区域土壤 pH 变化及影响因素进行了较多研究。Yang 等[5]运用 GIS 空间分析技术研究 1980—2000 年期间中国北方草原土壤 pH 的变化，结果表明 20 年间中国北部草原土壤 pH 平均下降了 0.63 个单位，其中 95%的土壤 pH 下降 0.54~0.73 个单位; Guo 等[6]利用 1980 年和 2000 年中国 35 个地区 154 块农田土壤 pH 分析数据统计表明，大量施用氮肥是研究期间土壤 pH 平均降低 0.5 个单位的主因。在区域尺度上，李婷等[7]研究表明 1982—2002 年间成都平原土壤 pH 平均值由 6.95 降低到 6.70，平均降低 3.60%；刘付程等[8]研究发现第 2 次土壤普查以来，太湖地区绝大多数土壤 pH 发生不同程度下降，平均降幅达 0.56 个单位。省域尺度上，王志刚等[9]通过比较江苏省第 2 次土壤普查和 2003 年采集的土壤表层样品 pH，发现近 20 年间全省土壤基本维持南酸北碱的格局，但局部地区明显酸化；曾招兵等[10]分析了广东省耕地地力调查样点数据表明，1984 年以来重化肥轻有机肥加速了广东省水田土壤的酸化。县域尺度上，刘丽等[11]借助 GIS 技术对辽宁省昌图县 1982 年和 2011 年两个时期土壤 pH 的空间变异情况进行比较，结果表明昌图县土壤 pH 均值由 1982 年的 6.85 下降到 2011 年的 6.07，年均下降 0.027 个单位；佀国涵等[12]利用湖北省宣恩县 2010—2012 年测土配方施肥项目的样点与第 2 次土壤普查的样点分析数据进行对比表明，棕壤、砾质岩山地黄棕壤和石英质山地黄棕壤 pH 下降幅度明显高于石灰岩山地黄棕壤。可见，国内外现有的相关研究主要聚焦于区域土壤 pH 的变化及其空间差异，并针对土壤 pH 变化的影响因素进行研究。然而目前多采用的简单的线性相关分析，无法揭示不同因素对土壤 pH 变化影响的程度高低。我国南方亚热

带地区高温多雨，盐基离子淋失量大，土壤自然酸化作用明显，加上多熟制栽培致使耕地土壤化肥施用量大，可能加速土壤酸化，耕地土壤酸化已成为制约我国亚热带地区耕地质量提升的主要限制因素之一。为此，本研究以地处亚热带地区的福建省为研究区，以 2008 年福建省耕地利用现状图为底图，利用该区域 1982 年第 2 次土壤普查 36 777 个和 2008 年耕地测土配方施肥 236 445 个表层样点分析数据建立的两期 1∶25 万耕地利用-土壤类型数据库，借助 GIS 与灰色斜率关联分析模型集成技术，研究该区域 26 年间耕地不同土壤类型和利用方式下酸化程度的差异及其影响因素，研究结果可为我国亚热带地区的耕地土壤酸化阻控和改良利用提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

福建省地处我国东南沿海，位于 23°30′~28°22′N, 115°50′~120°40′E，年均气温 15.8~21.7 ℃，最热月均温为 28 ℃，年均降水量 1 015~1 923 mm，年日照时数为 1 700~2 300 h，年均太阳辐射量为 427×10^3~532×10^3 $J\cdot cm^{-2}$，≥10 ℃积温高达 5 000~7 800 ℃，属于亚热带海洋性季风气候。地形以山地丘陵为主，地势总体上呈东南低，西北高。成土母质主要为残坡积物、冲积物、洪积物、海积物、风积物以及局部出现的牛轭湖相沉积物。2008 年末全省耕地土壤总面积 134.17 万 hm^2，以水稻土占优势，占耕地总面积的 93.05%；其次分别为赤红壤和红壤，分别占耕地总面积的 4.32%和 1.21%，其他类型土壤(潮土、黄壤、滨海盐土和紫色土)面积较小[13]。

1.2　基础资料收集

根据研究需要从福建省农业厅收集：(1)1982 年福建省 1∶25 万土壤类型分布图；(2)1982 年各县(市、区)36 777 个耕地土壤表层调查样点分布图及其相关属性数据资料；(3)2008 年各县(市、区)测土配方施肥(含地力调查)236 445 个耕层调查样点 GPS 定位坐标及其相关属性数据资料。从福建省国土资源厅收集 2008 年 1∶25 万福建省耕地利用现状和 DEM 数据库。从省统计局和国家气象局分别收集 1982—2008 年福建省农村统计年鉴和 66 个气象站点地理坐标及其相关气象观测数据资料。由于福建省较全面的酸雨监测普查工作始于 2000 年，为了揭示酸雨对土壤酸化的影响，从省环境保护厅收集 2000—2008 年 48 个酸雨监测点地理坐标及年均降水 pH 观测数据资料。

1.3　耕地利用-土壤类型及评价单元空间数据库的建立

借助 ARC/GIS 软件，从 2008 年福建省 1∶25 万土地利用现状图数据库提取耕地利用类型(旱地、水田和水浇地)图层，将矢量化的 1982 年 1∶25 万土壤类型数据库图层与耕地利用类型图层进行叠加分析，并根据野外调查结果对产生变化的土壤类型进行修正，建立福建省 1∶25 万耕地利用-土壤类型空间数据库。以耕地土壤类型(亚类)作为评价单元，全省耕地土壤共划分为 34 593 个评价单元。

1.4　耕地土壤调查样点和气象站点空间数据库的建立

利用第 2 次土壤普查调查样点分布图，根据调查样点所处的图斑单元及其周边地物特征，借助 ARC/GIS 以人机对话方式软件将 1982 年 36 777 个调查样点逐一转绘到耕地利用-土壤类型空间数据图层，生成第 2 次土壤普查调查样点空间数据图层；利用 2008 年耕地测土配方施肥(含地力调查)236 445 个调查样点的 GPS 定位坐标数据(其中 pH、有机质属性样点 236 445 个，CEC、砂粒、粉粒和黏粒等属性样点 29 945 个)，借助 ARC/GIS 的“Add XY Data”工具与耕地利用-土壤类型空间数据图层自动链接，生成 2008 年耕地测土配方施肥调查样点空间数据图层，然后分别与数据库格式的 1982 年和 2008 年调查样点相关土壤属性数据进行链接，分别建立 1982 年 36 777 个和 2008 年 236 445 个耕地土壤调查样点空间及属性数据库。分别利用 66 个气象站点和 48 个酸雨监测点地理坐标数据，借助 ARC/GIS 的“Add XY Data”工具与耕地利用-土壤类型空间数据图层自动链接，分别生成气象站点和酸雨监测点空间数据图层，然后与数据库格式的各气象站点相关气候观测数据和酸雨监测点年均降水 pH 监测数据进行链接，分别建立福建省 66 个气象站点和 48 个酸雨监测点空间及相关气候属性数据库。

1.5　相关属性空间数据库建立

本研究中涉及的相关属性包括土壤属性(CEC、pH、有机质、砂粒、粉粒和黏粒等)、气候属性(年均温和年降水量等)、酸雨属性(年均降水 pH 值)和施肥属性(氮、磷肥年施用量等)，借助 ARC/GIS 软件，采用普通克里格插值法[14]进行土壤 pH、有机质、CEC、砂粒、粉粒、黏粒和年均降水 pH 空间属性数据的点面推算，年均温和年均降水量均采用三维趋势面分析结合反距离权重插值残差订正法[15]进行空间属性数据的点面推算，分别生成福建省 1982 年和 2008 年相关属性栅格空间数据库。利用福建省耕地利用-土壤类型空间数据图层分别掩膜上述属性栅格空间数据图层，以耕地土壤亚类图斑为单元，然

后采用面积加权平均法计算并建立福建省耕地土壤亚类单元 CEC、pH、有机质、砂粒、粉粒、黏粒、年均温、年降水量和年均降水 pH 值空间属性数据库，进而将土壤普查和耕地测土配方施肥(含地力调查)土壤属性数据与土壤图单元对应起来。利用福建省耕地利用-土壤类型空间数据图层，以县行政区为单元，采用人机对话赋值法建立福建省耕地单元氮肥、磷肥年施用量空间属性数据库。

1.6 耕地土壤酸化程度空间数据库建立

借助 ARC/GIS 软件，将 2008 年和 1982 年的耕地土壤 pH 空间分布图层进行减法运算，得出各评价单元 pH 变化幅度(ΔpH)图层，将 2008 年土壤 pH<6.5 且 ΔpH<0 的耕地土壤归为酸化土壤，其他归为未酸化土壤。借助 DPS 软件的动态聚类分析工具将研究区酸化耕地土壤的酸化程度划分为弱度酸化(−0.50<ΔpH<0)、中度酸化(−1.50<ΔpH≤−0.50)和强度酸化(ΔpH≤−1.50)3 个等级。

1.7 耕地土壤酸化程度影响因素分析

从酸化土壤 pH 变化幅度图层提取出各酸化土壤单元的 ΔpH 值，建立各耕地单元酸化程度的因变量序列，从相应单元的其他属性图层提取出影响耕地土壤酸化程度的相关因素(CEC、有机质、砂粒、粉粒、黏粒、年均温、年降水量、年均降水 pH、年氮肥施用量、年磷肥施用量)属性值，建立相应单元的影响因素自变量序列。借助 DPS 统计软件，采用灰色斜率关联度分析模型，计算酸化土壤 pH 变化幅度与相关影响因子的关联度[16]，分析相关因子对土壤酸化程度的影响及其差异。

1.8 图件编制

利用 ARC/GIS 软件编制福建省耕地土壤酸化程度分区图，并添加图例、比例尺、指北针等要素后输出。

2 结果与分析

2.1 耕地土壤酸化及其程度分析

研究结果表明(表 1)，就酸碱性面积变化而言，1982 年福建省处于酸性和微酸性的耕地土壤分别占全省耕地总面积的 73.18%和 22.90%，处于强酸性、中性和微碱性的耕地土壤仅分别占 0.23%、3.48%和 0.21%；2008 年全省处于酸性和微酸性的耕地土壤分别占 75.18%和 17.64%，而强酸性、中性和微碱性耕地土壤则分别占 4.49%、2.00%和 0.24%。可见，26 年间全省强酸性、酸性耕地土壤分别增加了 4.26%和 2.00%，微碱性耕地土壤增加了 0.03%，而微酸性和中性耕地土壤分别减少了 5.26%和 1.48%。从酸性等级变化来看，26 年间全省有 75.30%的中性耕地土壤转化为微酸性、酸性和强酸性，55.72%的微酸性耕地土壤转化为酸性和强酸性。从土壤 pH 变化来看，26 年间全省有 33.05%的耕地土壤 pH 降低了 0~0.3 个单位，31.52%的耕地土壤 pH 降低了 0.3~1 个单位，5.43%的耕地土壤 pH 降低了 1 个单位以上。

表 1 1982—2008 年福建省耕地土壤酸碱性变化的转移矩阵
Table 1 Acidic or alkaline transfer matrix of cropland soil in Fujian Province from 1982 to 2008 %

1982 年土壤 pH Soil pH in 1982	2008 年土壤 pH Soil pH in 2008				
	pH<4.5	4.5≤pH<5.5	5.5≤pH<6.5	6.5≤pH<7.5	7.5≤pH<8.5
pH<4.5	—	98.03	1.97	—	—
4.5≤pH<5.5	4.16	86.90	8.84	0.11	—
5.5≤pH<6.5	7.99	47.73	39.09	4.93	0.26
6.5≤pH<7.5	2.07	12.44	60.79	21.25	3.44
7.5≤pH<8.5	—	—	48.99	24.29	26.72

从土壤酸化程度分析(表 2)，26 年间福建省 67.60%的耕地土壤发生不同程度地酸化，其中，弱度、中度和强度酸化的耕地土壤面积分别占全省耕地总面积的 48.52%、18.26%和 0.83%。弱度酸化耕地土壤分布较广，但主要分布于南平、三明和宁德市，分别占全省弱度酸化耕地土壤总面积的 20.71%、17.66%和 15.73%；其次分布于漳州和福州市，分别占全省弱度酸化耕地土壤总面积的 12.06%和 11.79%。中度酸化耕地土壤主要分布于南平市、龙岩市和泉州市，分别占全省中度酸化耕地土壤总面积的 29.88%、18.10%、16.94%；其次分布于漳州市、福州市，分别占全省中度酸化耕地土壤总面积的 10.58%和 9.33%。强度酸化耕地土壤分布相对较为集中，主要分布于龙岩市，占全省强度酸化耕地土壤总面积的 86.88%；其次分布于泉州市，占全省强度酸化耕地土壤总面积的 8.39%，南平、莆田和三明市则未见强度酸化耕地土壤。从土壤酸化程度整体分布而言，强度和中度酸化的耕地土壤主要分布在福建省北部的南平、西南部的龙岩和东南部沿海的泉州等地区，弱度酸化的耕地土壤主要分

表 2　1982—2008 年福建省各设区市耕地土壤酸化程度面积

Table 2　Areas of farmland with different acidification degrees in different municipalities of Fujian Province from 1982 to 2008

×10³ hm²

设区市 Municipality	耕地面积 Cropland area	酸化程度 Acidification degree		
		强度酸化 Strong acidification	中度酸化 Moderate acidification	弱度酸化 Low acidification
福州市 Fuzhou City	164.54	0.47	22.87	76.78
龙岩市 Longyan City	163.57	9.66	44.34	56.66
南平市 Nanping City	235.51	—	73.19	134.84
宁德市 Ningde City	159.99	—	6.74	102.40
莆田市 Putian City	75.39	—	8.38	25.39
泉州市 Quanzhou City	148.45	0.93	41.50	54.40
三明市 Sanming City	192.04	—	16.69	114.98
厦门市 Xiamen City	21.80	0.05	5.37	7.01
漳州市 Zhangzhou City	180.41	—	25.91	78.50
合计 Total	1 341.70	11.12	244.99	650.95

布在福建省北部的南平和宁德、西部的三明及东部福州、漳州等地区。

2.2　耕地不同土壤类型酸化程度分析

从耕地土壤亚类酸性类型面积变化分析(表 3), 1982—2008 年的 26 年间全省强酸性耕地土壤面积增加较多的亚类主要有渗育水稻土、潜育水稻土和潴育水稻土等, 以渗育水稻土亚类的强酸性面积增加最多, 增加了 6.11%, 其中 66.21%和 36.00%新增强酸性渗育水稻土分别由原酸性和微酸性渗育水稻土转化而来; 全省酸性耕地土壤面积增加较多的亚类主要有酸性紫色土、盐渍水稻土和赤红壤等, 以酸性紫色土亚类增加面积最大, 增加了 39.23%, 全部由原微酸性紫色土转化而来; 全省微酸性耕地土壤面积总体上呈减少趋势, 但面积增加最多的亚类为滨海风砂土, 增加了 32.17%, 全部由原中性滨海风砂土转化而来。

表 3　1982 年和 2008 年福建省耕地不同亚类土壤酸碱性面积比例

Table 3　Area proportions of acidic or alkaline soil in different subgroups of cropland soil in Fujian Province in 1982 and 2008　%

土壤亚类 Soil subgroup	pH<4.5		4.5≤pH<5.5		5.5≤pH<6.5		6.5≤pH<7.5		7.5≤pH<8.5	
	1982	2008	1982	2008	1982	2008	1982	2008	1982	2008
滨海风砂土 Coastal aeolian sand		—	—	0.68	30.09	62.26	69.91	36.46	—	0.60
滨海盐土 Coastal solonchaks	—	—	—	—	—	—	10.45	18.10	89.51	81.90
赤红壤 Latosolic red soil	—	—	—	6.03	61.64	72.48	38.36	21.50	—	—
红壤 Red soil	0.39	1.57	70.18	58.96	29.08	34.49	0.34	4.98	—	—
黄壤 Yellow soil	—	0.28	94.18	79.70	5.82	20.02	—	—	—	—
灰潮土 Greyfluvo-aquic soil	—	—	60.83	39.39	39.17	60.61	—	—	—	—
漂洗水稻土 Bleached paddy soil	—	0.91	77.76	80.67	22.24	17.97	—	0.44	—	—
潜育水稻土 Gleyed paddy soil	1.22	2.91	89.59	94.70	9.01	2.39	0.19	—	—	—
渗育水稻土 Percogenic paddy soil	0.22	6.33	81.52	83.46	18.06	9.94	0.20	0.27	—	—
酸性紫色土 Acid purplish soil	—	—	40.45	79.68	59.55	20.32	—	—	—	—
咸酸水稻土 Salted-acid paddy soil	—	—	2.28	2.28	97.72	97.72	—	—	—	—
淹育水稻土 Submergenic paddy soil	—	0.63	44.30	53.19	33.06	32.58	22.64	13.59	—	—
盐渍水稻土 Salinized paddy soil	—	—	—	17.26	71.85	70.38	25.60	12.31	2.55	0.04
潴育水稻土 Hydromorphic paddy soil	0.12	2.59	71.66	69.90	28.15	27.05	0.08	0.45	—	—

从酸化程度来看(表 4), 26 年间福建省耕地土壤除滨海盐土和咸酸水稻土亚类外, 其余耕地土壤亚类均发生不同程度酸化现象, 其中发生强度酸化面积最大的亚类主要为渗育水稻土和潴育水稻土, 合计面积占全省强度酸化耕地土壤总面积的 98.94%; 发生中度酸化面积最大的亚类为渗育水稻土, 占全省中度酸化耕地土壤总面积的 71.91%, 其次是潴育水稻土、赤红壤和潜育水稻土亚类, 合计占全省中度酸化耕地土壤总面积的 25.69%; 发生弱度酸化面积最大的耕地土壤亚类

也是渗育水稻土，占全省弱度酸化耕地土壤总面积的 74.77%，其次也是潴育水稻土、赤红壤和潜育水稻土亚类，合计占全省弱度酸化耕地土壤总面积的 21.71%。可见，26 年间福建省耕地土壤以渗育水稻土、潴育水稻土两个亚类的酸化程度相对较为严重。

表 4 1982—2008 年福建省耕地不同亚类土壤不同酸化程度面积

Table 4 Areas of different acidification degrees soils in different subgroups of cropland soil in Fujian Province from 1982 to 2008 $\times10^3$ hm^2

土壤亚类 Soil subgroup	面积 Area	酸化程度 Acidification degree		
		强度酸化 Strong acidification	中度酸化 Moderate acidification	弱度酸化 Light acidification
滨海风砂土 Coastal aeolian sand	8.22	—	3.19	1.63
滨海盐土 Coastal solonchaks	7.43	—	—	—
赤红壤 Latosolic red soil	57.94	0.05	17.96	18.39
红壤 Red soil	16.30	—	1.66	6.52
黄壤 Yellow soil	2.22	—	0.27	0.77
灰潮土 Greyfluvo-aquic soil	0.73	—	—	0.28
漂洗水稻土 Bleached paddy soil	4.61	—	0.45	2.58
潜育水稻土 Gleyed paddy soil	66.56	0.07	14.12	40.98
渗育水稻土 Percogenic paddy soil	928.74	9.26	176.18	486.70
酸性紫色土 Acid purplish soil	0.40	—	0.15	0.13
咸酸水稻土 Salted-acid paddy soil	0.11	—	—	—
淹育水稻土 Submergenic paddy soil	2.08	—	0.16	0.68
盐渍水稻土 Salinized paddy soil	41.97	—	—	10.33
潴育水稻土 Hydromorphic paddy soil	204.38	1.74	30.86	81.97

2.3 不同利用类型耕地土壤酸化程度分析

研究结果表明(表 5)，26 年间福建省水田、旱地和水浇地的酸碱性变化差异较大。与 1982 年相比，水田利用类型中的微酸性土壤面积减少 7.24%，而酸性和强酸性土壤面积则分别增加 2.34%和 5.38%，其中分别有 59.76%、10.20%、2.12%和 0.10%的微酸性水田土壤转化为酸性、强酸性、中性和微碱性。水浇地利用类型中的强酸性土壤面积净增 0.30%，系由原来的酸性和微酸性土壤转化而来；酸性土壤面积净增 3.29%，其中 15.26%由微酸性土壤转化而来；中性土壤面积净减 15.63%，其中有 85.55%的中性土壤变为微酸性，其余的变为酸性和强酸性。旱地利用类型中强酸性、微酸性土壤面积分别增加 1.57%和 3.17%，而酸性、中性和微碱性土壤面积则分别降低 0.54%、4.13%和 0.06%；有 68.57%的强酸性土壤变为酸性；22.25%的酸性土壤转化为强酸性、微酸性和中性；分别有 17.12%和 12.69%的微酸性土壤变为酸性和中性；78.22%的中性土壤变为酸性、微酸性和微碱性。

从酸化程度来看(表 6)，1982—2008 年 26 年间全省有 788.55×10^3 hm^2 的水田利用类型发生不同程度酸化，占全省水田总面积的 70.35%，其中强度、中度和弱度酸化面积分别占水田总面积的 0.90%、18.54%和 50.91%。水浇地利用类型的酸化面积为 29.37×10^3 hm^2，占全省水浇地总面积的 60.78%，其中强度、中度和弱度酸化面积分别占水浇地总面积 0.11%、24.01%和 36.66%。相对而言，全省旱地利用类型的酸化面积较小，占全省旱地总面积的 51.69%，其中强度、中度和弱度酸化面积分别占旱地总面积的 0.59%、14.80%和 36.30%。可见，自 1982 年以来，福建省耕地以水田利用类型酸化最为严重，水浇地次之，旱地酸化面积相对较小，其中水田和旱地以弱度酸化为主，水浇地发生中度和弱度酸化的面积相当。

表 5 1982 年和 2008 年福建省耕地不同利用类型土壤酸碱性面积比例

Table 5 Area proportions of acidic or alkaline soil of different cropland use types in Fujian Province in 1982 and 2008 %

利用类型 Land use type	pH<4.5		4.5≤pH<5.5		5.5≤pH<6.5		6.5≤pH<7.5		7.5≤pH<8.5	
	1982	2008	1982	2008	1982	2008	1982	2008	1982	2008
旱地 Dry farming field	0.11	1.68	41.78	41.24	44.32	47.49	13.19	9.06	0.59	0.53
水浇地 Irrigated field	0.10	0.30	44.33	47.62	27.36	38.04	25.89	10.26	2.32	3.78
水田 Paddy field	0.26	5.64	79.25	81.59	19.41	12.17	1.02	0.56	0.06	0.04

表 6　1982—2008 年福建省耕地不同利用类型酸化程度面积

Table 6　Areas of different cropland acidification degrees in different land use types in Fujian Province from 1982 to 2008　×10^3 hm^2

利用类型 Land use type	面积 Area	酸化程度 Acidification degree		
		强度酸化 Strong acidification	中度酸化 Moderate acidification	弱度酸化 Low acidification
旱地 Dry farming field	172.41	1.02	25.52	62.59
水浇地 Irrigated field	48.33	0.05	11.60	17.72
水田 Paddy field	1 120.95	10.05	207.87	570.63

2.4　耕地土壤酸化的影响因素分析

表 7 结果可见, CEC、黏粒、降水年均 pH、有机质和粉粒与耕地土壤酸化程度呈正相关, 表明这些影响因素的数值越高, 耕地土壤酸化程度越弱(即 ΔpH 值越大); 而年均降水量、砂粒、年均温及磷肥和氮磷肥施用量则与耕地土壤酸化程度呈负相关, 说明这些影响因素数值越高, 耕地土壤酸化程度越强(即 ΔpH 值越小)。

福建省耕地土壤 pH 变化幅度与影响因子关联系数绝对值|*R*|的大小顺序为: CEC>黏粒>降水年均 pH 值>年均降水量>有机质>砂粒>年平均温度>磷肥施用量>氮肥施用量>粉粒, 说明土壤 CEC、黏粒、降水年均 pH、年均降水量和有机质对福建省耕地土壤酸化程度影响最为显著, 关联系数绝对值|*R*|大于 0.850; 砂粒、年平均温度、磷肥及氮肥施用量对福建省耕地土壤酸化程度的影响程度居中, 关联系数绝对值|*R*|介于 0.800~0.850; 而粉粒的影响则较小, 关联系数绝对值|*R*|小于 0.790。说明降水年均 pH、年均降水量、年均温度、年磷肥和氮肥施用量是导致福建省耕地土壤酸化的主要外在因素, 而 CEC、黏粒、有机质和砂粒含量是减缓或加速福建省耕地土壤酸化的主要内在因素。

表 7　福建省耕地土壤酸化与影响因子的灰色关联分析

Table 7　Grey correlation analysis between cropland soil acidification and impact factors in Fujian Province

影响因子 Impact factor	关联系数 Gray correlation coefficient	影响因子 Impact factor	关联系数 Gray correlation coefficient
CEC	0.927	砂粒 Sand	−0.848
黏粒 Clay	0.921	年平均温度 Average annual temperature	−0.844
降水年均 pH Average annual pH of precipitation	0.907	磷肥施用量 Application amounts of P fertilizers	−0.831
年均降水量 Average annual precipitation	−0.898	氮肥施用量 Application amounts of N fertilizers	−0.807
有机质 Organic matter	0.851	粉粒 Silt	0.788

3　讨论

3.1　降水和温度对耕地土壤酸化的影响

自然和人为因素共同影响土壤酸碱性的形成。从土壤发育形成的过程来看, 自然因素的持续影响决定土壤pH的长期时空变化[17], 如我国土壤形成南酸北碱的格局, 正是由于温度和降水等自然因素长期作用所致。福建省地处亚热带气候区, 年均气温 15.8~21.7 ℃, 最热月均温为28 ℃, 年均降水量1 015~1 923 mm, ≥10 ℃积温高达5 000~7 800 ℃[13]。高温多雨的气候条件, 致使土壤中矿物分解和有机质矿化作用强烈, 盐基物质大量淋失, 土壤CEC和盐基饱和度降低, 氢饱和度上升, 导致土壤持续酸化。本研究结果表明, 全省耕地土壤pH变化幅度与年均降水量和年均气温关系密切, 关联系数绝对值|*R*|分别高达0.898和0.844, 故高温和多雨的气候条件是导致1982—2008年福建省67.60%的耕地土壤发生不同程度酸化的主要自然因素。其中降水量较大的北部地区(三明和南平市)发生酸化的耕地面积较大, 合计占全省酸化耕地总面积的37.45%, 而气温较高、降水量稍低的东南沿海地区(莆田、泉州、厦门和漳州市)发生酸化的耕地面积也占全省酸化耕地总面积的27.28%。

3.2　施肥和酸雨对耕地土壤酸化的影响

短期内土壤 pH 的剧烈变化则主要受人为因素的干扰[17]。长期不合理施肥, 特别是长期大量施用酸性或生理酸性化肥是引起土壤酸化的重要原因[18-19]。这是因为酸性(如过磷酸钙)或生理酸性(如硫酸铵)肥料施入土壤, 直接向土壤输入酸性物质磷酸导致土壤酸化[20], 或因植物喜好吸收 NH_4^+而使 SO_4^{2-}在土壤中残留并与作物代换吸收释放出来的 H^+(或离解出来的 H^+)结合成硫酸导致土壤酸化[2], 或 NH_4^+在土壤中发生硝化反应释放 H^+, 会加速土壤酸化[21]。据统计资料, 近 30 年来福建省化肥施用量持续增长, 2008 年化肥施用量高达 1.19×10^6 t, 是

1985 年的 2.42 倍，其中以氮磷肥占优势，分别占年化肥施用量的 39.90%~60.77%和 13.51%~17.25%。据福建省农村统计年鉴资料，26 年间耕地土壤酸化较为严重的南平、泉州、龙岩和漳州等设区市年均化肥施用量介于 508~1 980 $kg \cdot hm^{-2}$，是全省年均化肥施用量(434 $kg \cdot hm^{-2}$)的 1.17~4.56 倍，且施用的化肥以氮、磷肥为主，施用的磷肥则以酸性过磷酸钙占优势[22]。本研究结果表明，全省耕地土壤 pH 变化幅度与年磷肥和氮肥施用量关系密切，关联系数绝对值|R|分别高达 0.831 和 0.807。因此，长期持续大量施用尿素、氯化铵、硫酸铵和过磷酸钙等酸性或生理酸性肥料也是造成福建省耕地土壤大面积酸化的重要外因。

酸雨降落到地面，酸雨中的硫酸根离子和硝酸根离子均会直接加快土壤的酸化[23]。福建省属于全国的酸雨敏感区，酸雨较严重的区域位于福建省的北部、西部和南部，其中龙岩、泉州等城市的酸雨频率>50%[24]。本研究结果表明，全省耕地土壤 pH 变化幅度与降水年均 pH 值关系极为密切，关联系数高达 0.907，明显高于年均降水量、年均温度、年氮肥和磷肥施用量等外在致酸因素。因此，酸雨是导致福建省近 1982—2008 年耕地土壤普遍酸化的最主要外因。据全省酸雨监测点资料统计，南平、泉州和漳州等设区市的年均降雨 pH 分别为 5.2、5.1 和 4.6，较全省年均降水 pH 的均值(6.0)低 0.9~1.4 个单位，酸雨较为严重，致使南平、龙岩、泉州和漳州等市耕地土壤发生强度和中度酸化的耕地面积也较大，合计占全省强度和中度酸化耕地总面积的 95.27%和 75.49%。

3.3 利用方式对耕地土壤酸化的影响

福建省地处亚热带气候区，丰富的光温水条件决定了全省耕地适合多熟制栽培，主要耕作制度为烟-稻、稻-薯、稻-菜、马铃薯-双季晚稻、马铃薯-中稻-甘薯、春大豆-双季晚稻等[25]，因此福建省水田的利用方式以水旱轮作为主。与其他耕作模式相比，水旱轮作模式下，土壤 pH 平均下降速率是持续种稻模式的 10 倍[26]，水旱轮作更易造成土壤酸化。这是因为一方面水旱轮作模式下土壤由于相对较长的时间处于好气条件，易于 NH_4^+的硝化作用，致使土壤酸化；另一方面水旱轮作模式下土壤有较长时间的排水期，在此期间耕层土壤中大量的亚铁被氧化，氧化过程中质子的释放进一步导致土壤酸化[27]，且在水旱轮作模式下，增施酸性或生理酸性肥料可加速土壤酸化[28]，故 1982—2008 年福建省耕地以水田利用类型和水稻土类型的酸化最为严重，70.35%的水田和水稻土均发生不同程度酸化。水浇地灌溉活动也较为频繁，淋溶作用较水田弱，较旱地强，且灌水后一部分水分总是向上运动以补充地表蒸发和植物根系吸收，这会使致酸离子在土壤表层积累[29]，与旱地相比水浇地也更易酸化，故 1982—2008 年福建省耕地的水浇地利用类型酸化也较旱地严重，60.78%的水浇地发生不同程度酸化。旱地由于主要靠天然降水供给作物需水，灌溉活动较少，所以酸化程度相对较弱，1982—2008 年全省有 51.69%的旱地发生不同程度酸化。

3.4 土壤内在属性对耕地土壤酸化的影响

短期内土壤 pH 变化还取决于土壤自身抵制酸碱变化的能力[17]。土壤抵制酸碱变化的能力以土壤物质组成和地球化学性质为基础，土壤酸缓冲性能因土壤类型而异，故不同类型土壤酸化程度也有所不同。黏粒是土壤 CEC 的主要来源物，有机质是土壤 CEC 的主要贡献因子[30]，故有机质、黏粒含量和 CEC 高的耕地土壤，其酸缓冲能力强，土壤越不易酸化，而砂粒含量高、黏粒、有机质含量和 CEC 低的耕地土壤，对酸的缓冲能力弱，越易发生酸化。本研究结果表明，全省耕地土壤 pH 变化幅度与 CEC、黏粒、有机质和砂粒含量关系密切，关联系数分别高达 0.927、0.921、0.851 和 0.848，表明不同耕地土壤类型的 CEC、黏粒、有机质和砂粒含量等内在因素差异，对福建省耕地土壤酸化也具有不同程度地影响。全省紫色土和风砂土等土壤类型酸化较为严重，这是因为紫色土母质多为紫色砂砾岩和紫色凝灰熔岩，砂粒含量较高，有机质贫乏[19]；风砂土砂粒含量高达 85%以上，而黏粒和粉粒含量甚少，故黏粒和粉粒对有机质的保护能力弱，致使有机质矿化作用强烈[31]，导致福建省紫色土和风砂土的 CEC 低，土壤酸缓冲能力弱，此外，砂粒含量高的耕地土壤具有较大的孔隙，透水性好，导致土壤盐基物质易于淋失，致使 26 年间全省紫色土和风砂土也发生较普遍酸化，酸化面积比例仅次于水稻土。全省潮土发生酸化的面积较小，仅占潮土总面积的 38.43%，主要是由于潮土多分布于江河中下游的冲积平原区，其区位、交通和灌溉条件均十分优越，多已辟为菜地，长期的精耕细作和重视有机肥施用，致使潮土的黏粒、有机质含量和 CEC 均较高，对酸的缓冲能力较强而不易发生酸化。虽然滨海盐土黏粒含量较低，但由于其原始 pH 高，土壤中含有较多的中碱性盐，使其缓冲容量仅次于石灰土，且滨海盐土质子缓冲主要是通过土壤中的中碱性盐的中和反应，很快可达到平衡[32]，所以福建省的滨海盐土

成为全省土壤酸化的唯一例外。

4　结论

1982—2008年间, 地处亚热带的福建省67.60%的耕地土壤发生了不同程度酸化, 其中强度和中度酸化耕地主要分布在龙岩和泉州市。全省耕地土壤以渗育和潴育水稻土亚类发生强度、中度和弱度酸化的面积最大, 合计分别占全省相应酸化程度耕地土壤总面积的98.94%、84.51%和87.36%, 表明渗育和潴育水稻土亚类的酸化程度相对较为严重。全省耕地土壤以水田利用类型酸化最为严重, 酸化面积占水田总面积的70.35%; 旱地利用类型酸化面积相对较小, 占旱地总面积的51.69%。全省耕地土壤酸化程度与可能影响因子灰色关联系数绝对值大小顺序为: CEC>黏粒>降水年均 pH 值>年均降水量>有机质>砂粒>年平均温度>磷肥施用量>氮肥施用量>粉粒, 其中CEC、黏粒、降水年均pH、有机质和粉粒与酸化程度呈正相关; 年均降水量、砂粒、年均温及磷肥和氮磷肥施用量与酸化程度呈负相关。可见, 福建省耕地土壤酸化是自然和人为多种因素交互作用所致, 酸雨、高温多雨的气候和大量施用酸性或生理酸性肥料是加速福建省耕地土壤酸化的主要外因。

尽管本研究利用两期大样本数据对亚热带地区福建省的耕地土壤酸化程度进行了分析, 但土壤酸性调控不仅要了解土壤活性酸, 还需明确耕地土壤的潜性酸量, 以便准确计算酸化改良剂(如生石灰、生物炭等)的最佳施用量。因此, 今后的研究应进一步揭示土壤活性酸与潜性酸之间的关系, 建立科学的土壤潜性酸量估算模型, 进而准确估算耕地土壤潜性酸量, 为酸化耕地土壤合理改良提供科学依据。

参考文献　References

[1] 张翠萍, 孟平, 李建中, 等. 磷元素和土壤酸化交互作用对核桃幼苗光合特性的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(12): 1345–1355
Zhang C P, Meng P, Li J Z, et al. Interactive effects of soil acidification and phosphorus deficiency on photosynthetic characteristics and growth in *Juglans regia* seedlings[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(12): 1345–1355

[2] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3137–3143
Yu T Y, Sun X S, Shi C R, et al. Advances in soil acidification hazards and control techniques[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 3137–3143

[3] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 541–547
Yuan J H, Xu R K. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils[J]. Soils, 2012, 44(4): 541–547

[4] 赵其国, 吴志东, 张桃林. 我国东南红壤丘陵地区农业持续发展和生态环境建设Ⅰ. 优势、潜力和问题[J]. 土壤, 1998, 30(3): 113–120
Zhao Q G, Wu Z D, Zhang T L. The agricultural sustainable development and ecological environment construction of red soil hilly region in southeast China Ⅰ. advantages, potential and problems[J]. Soils, 1998, 30(3): 113–120

[5] Yang Y H, Ji C J, Ma W H, et al. Significant soil acidification across northern China's grasslands during 1980s–2000s[J]. Global Change Biology, 2012, 18(7): 2292–2300

[6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010

[7] 李婷, 张世熔, 干文芝. 成都平原土壤pH的时空分布特征及影响因素研究[J]. 四川农业大学学报, 2006, 24(3): 313–318
Li T, Zhang S R, Gan W Z. Temporal-spatial distribution characteristics and influence factors of soil pH in the Chengdu Plain[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2006, 24(3): 313–318

[8] 刘付程, 史学正, 于东升. 近20年来太湖流域典型地区土壤酸度的时空变异特征[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(6): 740–744
Liu F C, Shi X Z, Yu D S. Spatial and temporal variability of soil acidity in typical areas of Taihu lake region in the last 20 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(6): 740–744

[9] 王志刚, 赵永存, 廖启林, 等. 近20年来江苏省土壤pH值时空变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 720–727
Wang Z G, Zhao Y C, Liao Q L, et al. Spatio-temporal variation and associated affecting factors of soil pH in the past 20 years of Jiangsu Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 720–727

[10] 曾招兵, 曾思坚, 刘一锋, 等. 1984年以来广东水稻土pH变化趋势及影响因素[J]. 土壤, 2014, 46(4): 732–736
Zeng Z B, Zeng S J, Liu Y F, et al. Change tendency of paddy soil pH in Guangdong Province since 1984 and influential factors[J]. Soils, 2014, 46(4): 732–736

[11] 刘丽, 张玉龙, 虞娜, 等. 基于GIS的辽宁北部地区土壤酸化特征及其原因分析——以昌图县为例[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(2): 173–178
Liu L, Zhang Y L, Yu N, et al. Soil acidification characteristics and causes analysis in Changtu Region in Liaoning Province[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(2): 173–178

[12] 佀国涵, 王瑞, 袁家富, 等. 鄂西南山区土壤酸化趋势研究——以恩施州宣恩县为例[J]. 中国农学通报, 2014, 30(12): 151–155
Si G H, Wang R, Yuan J F, et al. Tendency of soil acidification in southwestern mountainous region of Hubei Province — A case study of Xuan'en County[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(12): 151–155

[13] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤[M]. 福州: 福建科学技

术出版社, 1991: 287–289
Soil Survey Office in Fujian Province. Soils of Fujian[M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Publishing House, 1991: 287–289

[14] 龙军, 张黎明, 沈金泉, 等. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1270–1281
Long J, Zhang L M, Shen J Q, et al. Spatial interpolation of soil organic matter in farmlands in areas complex in landform[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(6): 1270–1281

[15] 李增兵, 赵庚星, 赵倩倩, 等. 县域耕地地力评价中土壤养分空间插值方法的比较研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(20): 230–236
Li Z B, Zhao G X, Zhao Q Q, et al. Comparison of spatial interpolation methods for soil nutrients in cultivated land fertility evaluation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(20): 230–236

[16] 方睿红, 常庆瑞, 宋利珍, 等. 改进灰色关联模型在秦巴山区耕地地力评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 122–126
Fang R H, Chang Q R, Song L Z, et al. Application of modified grey relational model to evaluating farmland productivity in Qinling-Bashan mountainous area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 122–126

[17] 郭治兴, 王静, 柴敏, 等. 近30年来广东省土壤pH值的时空变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 425–430
Guo Z X, Wang J, Chai M, et al. Spatiotemporal variation of soil pH in Guangdong Province of China in past 30 years[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 425–430

[18] Jaiyeoba I A. Changes in soil properties due to continuous cultivation in Nigerian semiarid Savannah[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 70(1): 91–98

[19] Gudmundsson T, Björnsson H, Thorvaldsson G. Organic carbon accumulation and pH changes in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland[J]. CATENA, 2004, 56(1/3): 213–224

[20] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的pH演变[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109–1116
Meng H Q, Liu J, Xu M G, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(6): 1109–1116

[21] 汪吉东, 许仙菊, 宁运旺, 等. 土壤加速酸化的主要农业驱动因素研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(4): 627–633
Wang J D, Xu X J, Ning Y W, et al. Progresses in agricultural driving factors on accelerated acidification of soils[J]. Soils, 2015, 47(4): 627–633

[22] 吴捷. 福建省种植业化肥施用的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009
Wu J. Study on the chemical fertilizer application of farming system in Fujian Province[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009

[23] 袁珍贵, 杨晶, 郭莉莉, 等. 酸化对土壤质量的影响及酸化土壤的主要改良措施研究进展[J]. 农学学报, 2015, 5(7): 51–55
Yuan Z G, Yang J, Guo L L, et al. Research progress on effect of acidification on soil quality and main improving measures for acidified soil[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(7): 51–55

[24] 赵卫红. 福建省城市酸性降水特征及变化趋势[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(9): 41–43
Zhao W H. Urban acid precipitation in Fujian Province: Characteristic and tendency[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(9): 41–43

[25] 罗文光, 丛艳静, 邢世和. 基于GIS技术的福建省耕地价值评价及其空间分异[J]. 土壤, 2009, 41(2): 295–302
Luo W G, Cong Y J, Xing S H. Value evaluation of cultivated land and spatial variation in Fujian Province based on GIS[J]. Soils, 2009, 41(2): 295–302

[26] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1615–1621
Zhou X Y, Xu M G, Zhou S W, et al. Soil acidification characteristics in southern China's croplands under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1615–1621

[27] 李艾芬, 范文俊, 陆建中, 等. 浙江省嘉兴市郊水稻土酸度比较研究[J]. 土壤, 2010, 42(4): 644–647
Li A F, Fan W J, Lu J Z, et al. Comparison between paddy soil acidity in suburbs of Jiaxing City, Zhejiang Province[J]. Soils, 2010, 42(4): 644–647

[28] Poss R, Smith C J, Dunin F X, et al. Rate of soil acidification under wheat in a semi-arid environment[J]. Plant and Soil, 1995, 177(1): 85–100

[29] 李爽, 张玉龙, 范庆锋, 等. 不同灌溉方式对保护地土壤酸化特征的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 909–915
Li S, Zhang Y L, Fan Q F, et al. Effect of irrigation mode on soil acidification in protected field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 909–915

[30] 安战士, 徐明岗. 陕西三种土壤的有机质和黏粒对土壤阳离子交换量的贡献[J]. 土壤, 1988, 20(6): 310–313
An Z S, Xu M G. Contributions of clay and organic matter on the soil cation exchange capacity of three soils in Shaanxi Province[J]. Soils, 1988, 20(6): 310–313

[31] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 土壤细颗粒对有机质的保护能力研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 748–752
Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, et al. A review on protection capacity of soil organic matter by fine particles[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(5): 748–752

[32] 仇荣亮, 张云霓, 莫大伦. 南方土壤酸沉降敏感性研究Ⅵ.固相组成与酸缓冲性能[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 517–521
Qiu R L, Zhang Y N, Mo D L. Sensitivity of soil to acid deposition in south China Ⅵ. Soil solid components and acid buffering capacity[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18(5): 517–521